

博斯腾湖湿地边缘带农田土壤重金属的污染风险评价^①

麦麦提吐尔逊·艾则孜¹, 阿吉古丽·马木提¹, 买托合提·阿那依提¹, 艾尼瓦尔·买买提²

(1 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2 新疆大学化学与化工学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 对新疆博斯腾湖湿地边缘带农田土壤中 8 种重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn)地球化学特征进行分析。采用污染负荷指数(PLI)、潜在生态风险指数(RI)和生态风险预警指数(I_{ER})对农田土壤重金属污染与环境风险进行评价。结果表明: 湿地边缘带农田土壤 Pb 和 Zn 呈现重度污染, As、Cd、Cr 和 Ni 轻度污染, Cu 轻微污染, Mn 无污染。土壤 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 平均含量处于轻微风险水平。Cd 是污染程度与生态风险等级最高的重金属元素; 湿地边缘带农田土壤 PLI 平均值为 1.43, 呈现轻度污染, RI 平均值为 20.62, 呈现轻微生态风险状态, I_{ER} 的平均值为 -4.53, 呈现无警态势。湿地边缘带 PLI、RI 与 I_{ER} 空间分布格局基本一致; 湿地边缘带农田土壤 Pb 与 Zn 来源主要受到人类活动的影响, Cr、Cu、Mn 与 Ni 来源主要受到土壤地球化学作用的控制, As 与 Cd 受自然因素和人为因素共同影响。

关键词: 土壤; 重金属污染; 生态风险; 预警; 博斯腾湖

中图分类号: X53 **文献标识码:** A

农田土壤重金属污染影响农作物正常生长和农产品质量安全、危害人类和动物健康, 从而成为科学界关注的热点问题^[1-3]。重金属元素由于具有潜伏性强、迁移速率慢、生态环境效应复杂等特点, 土壤中重金属元素不仅通过积累影响地球表面生态系统服务功能, 而且通过生态系统间的循环对人体健康造成威胁^[4-7]。

近年来, 随着我国农业集约化的加剧与工农业迅速发展, 具有生理毒性的物质进入土壤系统而导致土壤环境恶化、功能失调, 土壤重金属污染风险日益加剧, 已成为主要生态环境问题之一^[8]。重金属作为土壤系统中具有潜在危害的重要污染物, 湿地边缘带重金属污染是导致湿地退化的重要驱动因子之一^[9]。干旱区内陆湿地作为干旱区一种独特的生态资源, 对干旱区生态环境平衡起到重要的作用。内陆干旱区湿地所占据的面积虽小, 发挥的生态环境作用却很大, 它不仅维持干旱区生命活动, 而且对物质和能量的循环有重要的意义^[10-11]。近年来, 干旱区绿洲城市化与工农业迅速发展使得内陆湿地成为人类活动污染物的承泄区, 污染物积累使内陆湿地环境恶化, 生态功能受到严重威胁^[12]。

因此, 对干旱区内陆湿地流域土壤污染及生态风险进行评价是维持内陆湿地生态系统健康和绿洲生态安全的基础。

基于此, 本文以博斯腾湖湖滨湿地边缘带作为研究区, 测定湿地边缘带农田土壤砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、锰(Mn)、镍(Ni)、铅(Pb)和锌(Zn)含量, 采用污染负荷指数、潜在生态风险指数以及生态风险预警指数, 对湿地边缘带农田土壤重金属污染及其潜在危害进行评估, 以期对博斯腾湖湿地生态安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

博斯腾湖(86°40'~87°25'E, 41°47'~42°10'N)是我国最大的内陆淡水湖泊, 位于南天山主脉和支脉之间的焉耆盆地腹地(图 1), 是焉耆盆地地表水、地下水的汇集区。博斯腾湖湖滨湿地位于博斯腾湖西部, 该区域气候属于暖温带大陆性干旱荒漠气候, 海拔 1 050~1 070 m, 多年平均降水量约 70 mm, 多年平均蒸发量约 2 500 mm, 多年平均气温约 8.8 °C。因受博斯腾湖水域的调节, 冷热变化不十分剧烈, 日照

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561073, 41661037)和新疆杰出青年科技人才培养项目(qn2015jq003)资助。

作者简介: 麦麦提吐尔逊·艾则孜(1981—), 男, 新疆喀什人, 博士, 副教授, 主要从事绿洲土壤环境安全研究。E-mail: ecohydrology@126.com

时间长,热量较丰富, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温约 $3\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。湿地边缘带土壤类型主要为灌耕沼泽土、灌耕草甸土、灌耕棕漠土、灌漠土、灌耕石质土、灌耕风沙土、盐土等土壤类型。自然植被以香蒲(*Typha orientalis*)、芦苇(*Phragmites communis*)和红柳(*Tamarix ramosissima*)等为主,边缘带农田主要农作物类型包括辣椒、番茄与小麦等^[12]。

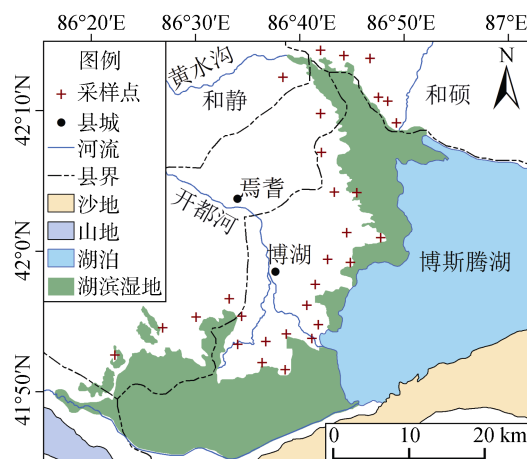


图 1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 The location of study area and sampling points

1.2 土壤样品采集与测定

2016年5—8月在博斯腾湖湿地边缘带采集农田表层(0~20 cm)土壤样品,共采集30个典型土壤样品。样品采集过程中,参照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2000)^[13]。采用10 m×10 m内“梅花形”布设5个子样点,每个子样点采集表层土壤200 mg,将其充分混合后装入自封塑料袋内。所有土壤样品室温下风干,用塑料棒碾碎,充分混合后从中多点(约40点)取样20 g,用玛瑙研钵进一步研磨,通过0.15 mm尼龙筛混匀后备用。测定耕地土壤样品中As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb与Zn含量。测定方法参考了《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)^[14],采用HNO₃-HCl-HF-HClO₄法电热板加热消解并处理后,As含量用PERSEE原子荧光光度计(PF-7)测定,Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn的含量用火焰原子吸收光谱仪(Agilent 200AA)测定。每批土样做3次空白样和平行样,取平均值作为样品重金属元素的最终含量。测试过程中加入国家标准土壤参比物质(GSS-12)进行质量控制,各重金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。土壤重金属含量委托新疆大学理化测试中心测定。

1.3 污染评价方法

1.3.1 污染负荷指数法 以新疆灌耕土背景值^[15]为参比值,采用Tomlinson提出的污染负荷指数法(PLI)对博斯腾湖湿地边缘带农田土壤重金属进行污染评价^[16],其计算公式为:

$$CF_i = c_i / c_n \quad (1)$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (2)$$

式中: CF_i 为重金属 i 的污染指数; c_i 为重金属 i 的测试浓度; c_n 为重金属 i 的评价标准。 CF_i 的污染分级标准为: $CF_i \leq 0.7$ 属于无污染, $0.7 < CF_i \leq 1$ 属于轻微污染, $1 < CF_i \leq 2$ 属于轻度污染, $2 < CF_i \leq 3$ 属于中度污染, $CF_i \geq 3$ 属于重度污染。 PLI 为重金属污染负荷指数, n 为参加评选的重金属元素个数; PLI 的污染分级标准为: $PLI \leq 0.7$ 属于无污染, $0.7 < PLI \leq 1$ 属于轻微污染, $1 < PLI \leq 2$ 属于轻度污染, $2 < PLI \leq 3$ 属于中度污染, $PLI \geq 3$ 属于重度污染。

1.3.2 潜在生态风险指数法 以《国家土壤环境质量标准》(GB15618—1995)^[17]中的二级标准($pH > 7.5$)为参比值,采用Håkanson^[18]提出的潜在生态风险指数(RI)对湿地边缘带农田土壤重金属进行潜在生态风险评价。单一重金属元素潜在生态风险指数 E_j^i 和多项重金属元素综合潜在生态风险指数 RI_j 的计算公式如下:

$$RI_j = \sum_{i=1}^n E_j^i = \sum_{i=1}^n T^i \times C_j^i = \sum_{i=1}^n T_i \times \frac{c_j^i}{c_r^i} \quad (3)$$

式中: RI_j 为 j 样点多种重金属综合潜在生态风险指数; E_j^i 为 j 样点重金属 i 的单项潜在生态风险指数; C_j^i 为 j 样点重金属 i 的污染指数; c_j^i 为 j 样点土壤重金属 i 的实测浓度; c_r^i 为重金属 i 的参比值; T^i 为重金属 i 的毒性系数,反映重金属在水相、固相和生物相之间的响应关系,可以综合反映重金属的毒性、污染水平和污染的敏感程度。(重金属As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn的毒性系数分别为10、30、2、5、5、5和1)^[35]。 E_j^i 的生态风险程度分级标准为: $E_j^i \leq 40$ 属于轻微风险, $40 < E_j^i \leq 80$ 属于中等风险, $80 < E_j^i \leq 160$ 属于较强风险, $160 < E_j^i \leq 320$ 属于很强风险, $E_j^i > 320$ 属于极强风险; RI_j 的生态风险程度分级标准为: $RI_j \leq 150$ 属于轻微风险, $150 < RI_j \leq 300$ 属于中等风险, $300 < RI_j \leq 600$ 属于较强风险, $600 < RI_j \leq 1\ 200$ 属于很强风险, $RI_j > 1\ 200$ 属于极强风险。

1.3.3 潜在生态风险指数法 以国家二级标准为参比值,采用Rapant和Kordik^[19]提出的生态风险预警指数(I_{ER})对湿地边缘带农田土壤生态风险进行预警评估,为湿地边缘带土壤污染生态风险可能出现的危机而建立了预警。 I_{ER} 计算公式为:

$$I_{ER} = \sum_{i=1}^n I_{ERi} = \sum_{i=1}^n (C_{Ai} / C_{Ri} - 1) \quad (4)$$

式中: I_{ER} 为生态风险预警指数; I_{ERi} 为超过临界限量的第 i 种重金属生态风险指数; C_{Ai} 为第 i 种重金属的

实测含量； C_{Ri} 为第 i 种重金属的临界限量。 I_{ER} 的生态风险预警级别分级标准为： $I_{ER} \leq 0$ 属于无警， $0 < I_{ER} \leq 1$ 属于预警， $1 < I_{ER} \leq 3$ 属于轻警， $3 < I_{ER} \leq 5$ 属于中警， $I_{ER} > 5$ 属于重警。

2 结果与讨论

2.1 湿地边缘带农田土壤重金属含量特征

博斯腾湖湿地边缘带农田土壤中重金属含量统计分析结果见表 1，湿地边缘带土壤 As、Cd、Cr、Cu、

Mn、Ni、Pb 和 Zn 含量变幅分别为 1.17~63.87、0.11~0.35、33.79~75.97、15.91~43.38、363.01~572.03、21.68~53.25、0.99~81.22 和 39.32~719.35 mg/kg，平均含量分别为 9.63、0.21、51.74、29.09、472.56、37.09、48.26 和 141.29 mg/kg。所有元素的平均含量均未超出国家土壤环境质量二级标准。土壤 Cu 和 Mn 的平均含量未超出新疆灌耕土背景值，As、Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别超出新疆灌耕土背景值 1.06、1.75、1.31、1.40、3.57 和 8.41 倍。

表 1 湿地边缘带农田土壤重金属含量统计 ($n=30$)
Table 1 Statistic of heavy metal concentrations in marginal zone of wetland

指标	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
最小值(mg/kg)	1.17	0.11	33.79	15.91	363.01	21.68	0.99	39.32
最大值(mg/kg)	63.87	0.35	75.97	43.38	572.03	53.25	81.22	719.35
平均值(mg/kg)	9.63	0.21	51.74	29.09	472.56	37.09	48.26	141.29
标准误差(mg/kg)	14.67	0.07	8.96	6.38	51.23	6.99	27.75	155.51
变异系数	1.52	0.33	0.17	0.22	0.11	0.19	0.58	1.10
偏度系数	2.90	0.90	0.66	0.19	-0.37	0.18	-0.31	2.48
峰度系数	8.30	-0.20	0.76	-0.12	-0.32	0.48	-1.63	6.22
新疆灌耕土背景值(mg/kg)	9.09	0.12	39.60	35.80	688.0	26.40	13.50	16.80
国家土壤环境质量二级标准(mg/kg)	25.0	0.60	250.0	100.0	-	60.0	350.0	300.0

偏度系数(Skewness)是表达数据分布形态的统计量，偏度的绝对值越大表示其分布形态的偏斜程度越大。峰度系数(Kurtosis)是表达总体中所有取值分布形态陡缓程度的统计量，峰度的绝对值越大表示其分布形态的陡缓程度与正态分布的差异程度越大。土壤中 As 和 Zn 的偏度系数(分别为 2.90 和 2.48)和峰度系数(8.30 和 6.22)较大，表明部分土壤样本中 As 和 Zn 呈现含量高值区，处于高积累状况。变异系数(CV)能反映各样点重金属含量的平均变异程度，变异系数越大，表明重金属含量空间分布越不均匀，存在点源污染可能性越大^[20]。湿地边缘带农田土壤中重金属 As、Pb 和 Zn 的变异系数分别为 1.52、0.58 和 1.10，呈现强变异($CV > 0.50$)，表明 As、Pb 和 Zn 可能受某些局部污染源的影响比较明显。Cd 的变异系数为 0.33，呈现中等变异($0.25 < CV < 0.50$)，表明人为因素可能对 Cd 积累有一定的影响。Cr、Cu、Mn 和 Ni 的变异系数均呈现弱变异($CV < 0.25$)，表明自然因素很可能对这些重金属元素的影响较明显。

2.2 湿地边缘带农田土壤重金属污染特征

以新疆灌耕土背景值作参比值，根据污染划分标准，进行博斯腾湖湿地边缘带农田土壤重金属污染水平评价。结果表明，湿地边缘带农田土壤各重金属元素单项污染指数(CF)平均值大小顺序依次为：

$Zn(8.41) > Pb(3.57) > Cd(1.78) > Ni(1.40) > Cr(1.31) > As(1.06) > Cu(0.81) > Mn(0.69)$ 。Pb 和 Zn 属于重度污染，As、Cd、Cr 和 Ni 轻度污染，Cu 属于轻微污染，Mn 无污染。从各重金属元素不同污染级别样点数占样点总数的比例来看(表 2)，As 无污染、轻微、轻度和重度污染样点数分别占样点总数的 66.67%、3.33%、20.0% 和 10.0%；Cd 轻微、轻度和中度污染样点数分别占样点总数的 6.67%、66.67% 和 26.66%；大部分样点 Cr 和 Ni 的污染指数属于轻度污染，Cr 和 Ni 轻度污染样点数分别占样点总数的 96.67% 和 90.0%；Cu 无污染、轻微和轻度污染样点数分别占样点总数的 33.33%、56.67% 和 10.0%；Mn 无污染和轻微污染样点数分别占样点总数的 53.33% 和 46.67%；大部分样点 Pb 和 Zn 的污染指数属于重度污染，Pb 和 Zn 重度污染样点数分别占样点总数的 56.67% 和 96.67%。湿地边缘带农田土壤综合污染指数(PLI)变化范围在 0.75~1.96 之间，平均值为 1.43，呈现轻度污染，PLI 最大值呈现中度污染。PLI 属于轻微和轻度污染的样点数分别占样点总数的 13.33% 和 86.67%。

2.3 潜在生态危害评价

以国家土壤环境质量二级标准作参比值，根据生态风险划分标准，进行博斯腾湖湿地边缘带农田土壤重金属污染的潜在生态风险评价。结果表明(表 3)，湿

地边缘带农田土壤重金属单项潜在生态风险指数(E)的平均值大小顺序依次为: $Cd(10.65)>As(3.85)>Ni(3.09)>Cu(1.45)>Pb(0.69)>Zn(0.47)>Cr(0.41)$ 。所有

样点 As 、 Cr 、 Cu 、 Ni 、 Pb 和 Zn 的潜在生态风险指数均小于 40, 处于轻微风险水平。 Cd 的潜在生态风险指数最高, 表明 Cd 是研究区最主要的生态风险因子。

表 2 湿地边缘带不同污染级别样点数占样点总数的百分比(% , $n = 30$)
Table 2 Percentages of sites at different pollution levels in total sample sites in marginal zone of wetland

污染等级	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	PLI
无污染	66.67	0	0	33.33	53.33	0	10.0	0	0
轻微污染	3.33	6.67	3.33	56.67	46.67	6.67	0	0	13.33
轻度污染	20.0	66.67	96.67	10.0	0	90.0	33.33	0	86.67
中度污染	0	26.66	0	0	0	3.33	0	3.33	0
重度污染	10.0	0	0	0	0	0	56.67	96.67	0

表 3 湿地边缘带农田土壤重金属潜在生态风险评价($n = 30$)
Table 3 Potential ecological risk assessment of heavy metals in farmland in marginal zone of wetland

统计值	E							RI	I_{ER}
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		
最小值	0.47	5.50	0.27	0.80	1.81	0.01	0.13	11.49	-5.51
最大值	25.55	17.50	0.61	2.17	4.44	1.16	2.40	41.80	-2.63
平均值	3.85	10.65	0.41	1.45	3.09	0.69	0.47	20.62	-4.53

湿地边缘带农田土壤综合潜在生态风险指数(RI)变化范围介于 11.49 ~ 41.80, 平均值为 20.62, 呈现轻微生态风险态势。所有样点 RI 呈现为轻微生态风险; 研究区生态风险预警指数(I_{ER})变化范围介于 -5.51 ~ -2.63, 平均值为 -4.53, 呈现无警态势。所有样点 I_{ER} 呈现为无警态势。

2.4 PLI、RI 与 I_{ER} 的空间分布格局

根据各采样点计算得到的 PLI、RI 与 I_{ER} 值, 利用 ArcGIS10.3 软件, 绘制了 PLI、RI 与 I_{ER} 空间分布图(图 2)。

从图 2 可知, PLI、RI 与 I_{ER} 空间分布格局基本一致。PLI 呈现轻微、轻度污染, RI 生态风险指数以及 I_{ER} 生态风险预警指数较高的样点主要分布于博斯腾湖湿地边缘带北部与南部的区域。湿地边缘带中部区域农田土壤 PLI、RI 和 I_{ER} 值较低。由于 PLI、RI 与 I_{ER} 突出单项污染指数值最大的重金属元素对土壤污染与生态风险的影响和作用, 使其对土壤环境污染

评价的灵敏性不够高, 从而导致 Cd 、 Zn 与 Pb 在湿地边缘带 PLI、RI 与 I_{ER} 中占据了较大的比重, 并没有完全反映土壤重金属元素综合污染特征, 增加了湿地边缘带农田土壤重金属污染程度。

2.5 土壤重金属来源解释

相关分析法可以用来判别土壤中重金属的来源。若重金属元素间相关性极显著, 则说明重金属元素间可能具有相似的来源途径^[21-22]。利用 SPSS19.0 软件计算得到湿地边缘带农田土壤中各重金属元素间相关系数(表 4)。由表 4 可见, 土壤 $Cu-Ni$ 、 $Cr-Pb$ 、 $Ni-Pb$ 之间的 Person 相关系数较高, 达到 $P<0.01$ 显著水平。 $Cd-Mn$ 、 $Cr-Cu$ 、 $Cr-Mn$ 、 $Cu-Mn$ 、 $Ni-Zn$ 和 $Pb-Zn$ 之间的相关系数也较高, 达到 $P<0.05$ 显著水平, 表明湿地边缘带农田土壤中 $Cd-Mn$ 、 $Cr-Cu-Mn-Pb$ 、 $Cu-Mn-Ni$ 和 $Ni-Pb-Zn$ 等元素可能具有相同来源。由于这些重金属元素间相关关系比较复杂, 元素来源途径可以通过进一步的因子分析进行判别。

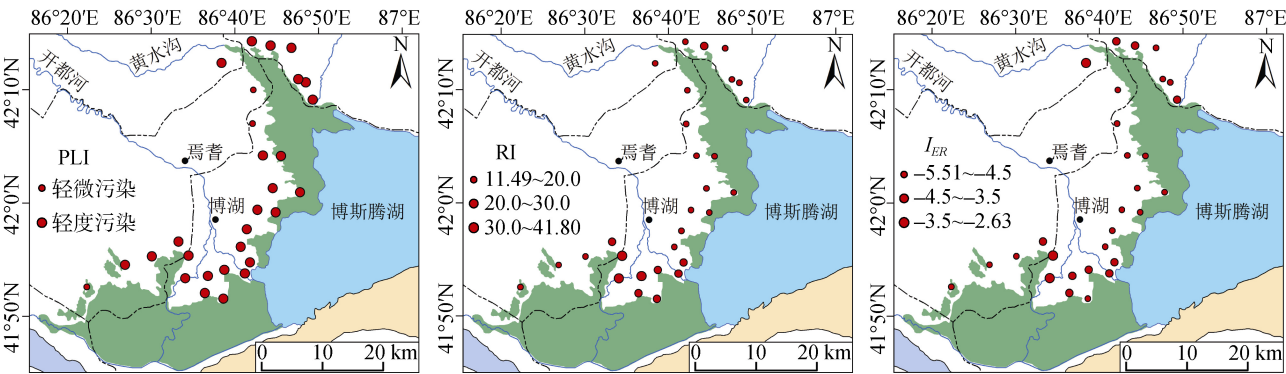


图 2 湿地边缘带农田土壤 PLI、RI 与 I_{ER} 空间分布格局
Fig. 2 Spatial distribution patterns of PLI, RI and I_{ER} of farmland soils in marginal zone of wetland

表 4 湿地边缘带农田土壤重金属元素之间相关系数
Table 4 Correlation coefficients between heavy metals in farmland soils of marginal zone of wetland

元素	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
As	0.23	-0.03	-0.11	0.06	0.31	-0.20	-0.22
Cd		-0.14	0.09	0.42*	0.35	0.06	0.08
Cr			0.42*	0.41*	0.04	-0.51**	0.09
Cu				0.43*	0.49**	0.18	-0.33
Mn					0.26	0.03	-0.14
Ni						0.47**	-0.43*
Pb							-0.40*

注：** 表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平，* 表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平。

因子分析是用于区分重金属元素自然来源和人为来源常用的一类方法^[23]。因子分析结果表明(表 5),前 3 个主成分特征值大于 1,累计方差贡献率达到 80.15%,符合分析要求,对分析的指标能给出较充分的概括。第一主成分的方差贡献率为 42.60%,Cr、Cu、Mn 与 Ni 在第一主成分上具有较大载荷,分别为 0.89、0.72、0.61 与 0.84。土壤中 Cr、Cu、Mn 与 Ni 的变异系数均呈现弱变异,偏度、峰度系数也很小,土壤中 Cr、Cu、Mn 与 Ni 含量的平均值与新疆灌耕土背景值较接近(表 1)。此外,前人研究结果显示^[23],土壤中这些因素主要为地质来源,受土壤地球化学作用(成土母质和地形条件)影响,故研究区土壤 Cr、Cu、Mn 与 Ni 主要受到自然因素的影响。

第二主成分上重金属 Pb 与 Zn 具有较高的载荷,分别为 -0.73 与 0.61。土壤中 Pb 与 Zn 的变异系数均呈现强变异,偏度、峰度系数也较大,Pb 与 Zn 含量的平均值分别超出新疆灌耕土背景值的 3.57 和 8.41 倍(表 1)。相关研究认为^[24-26],土壤中 Pb 与 Zn 等元素主要受人类活动的影响。这表明研究区土壤 Pb 与 Zn 主要受到人为因素的影响。

第三主成分上重金属 As 与 Cd 均具有较高的载荷。As 含量的平均值低于新疆灌耕土背景值,但 As 含量的变异系数呈现强变异,其偏度、峰度系数也较大,表明部分区域 As 含量积累很明显,As 在部分区域受到人为污染的影响,其他区域主要受到土壤地球化学特征的影响。相关研究表明农田土壤中 As 主要来源于农药和化肥等人类活动^[27]。研究区是新疆加工辣椒主产区,研究区农业生产过程中农药和化肥等很可能导致耕地土壤中 As 的积累。研究表明^[23],Cd 可作为施用化肥与农药等农业活动的标识元素。虽然湿地边缘带 Cd 含量超标较严重,但 Cd 变异系数以及偏度、峰度系数较小,分布较均匀。研究区位于新疆北天山主脉的依连哈比尔尕山及其支脉科克铁克山、霍拉山中间的蒙尔宾山和南部的库鲁克塔格山组成的复杂地貌形态的中生代断陷盆地的腹地,研究区成土母质主要为湖积淤积物母质和开都河下游冲积-洪积母质。相关研究显示^[28],研究区成土母质一定程度上导致土壤中 Cu、As 和 Cd 等元素的自然积累,控制了土壤中 As 和 Cd 等元素的含量。以上分析可以看出,湿地边缘带农田土壤中 As 与 Cd 含量受自然因素和人为因素共同控制。

表 5 湿地边缘带土壤重金属元素因子载荷
Table 5 Factor matrix for soil heavy metal elements in marginal zone of wetland

主成分	初始特征值			主成分载荷							
	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
F1	2.45	42.60	42.60	0.25	0.43	0.89	0.72	0.61	0.84	0.47	-0.34
F2	1.82	20.70	63.30	0.00	0.05	0.16	0.32	0.50	-0.18	-0.73	0.61
F3	1.15	16.85	80.15	0.72	0.67	-0.23	-0.43	0.09	0.10	-0.29	0.21

3 结论

博斯腾湖湿地边缘带农田土壤重金属元素有一定的积累,直接威胁湿地生态环境安全。湿地边缘带农田土壤中 As、Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量

分别超出新疆灌耕土背景值的 1.06、1.75、1.31、1.40、3.57 和 8.41 倍。Pb 和 Zn 呈现重度污染,As、Cd、Cr 和 Ni 轻度污染,Cu 轻微污染,Mn 无污染。土壤 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 平均含量处于轻微风险水平。从研究区土壤重金属污染与生态风险评价

结果来看, Cd 是研究区农田土壤污染程度与生态风险等级最高的重金属元素, 对研究区污染负荷指数、潜在生态风险指数和生态风险预警指数的贡献非常大。湿地边缘带农田土壤 PLI 平均值为 1.43, 呈现轻度污染, RI 平均值为 20.62, 呈现轻微生态风险态势, I_{ER} 的平均值为 -4.53, 呈现无警态势。湿地边缘带 PLI、RI 与 I_{ER} 空间分布格局基本一致, 湿地边缘带北部与南部的区域污染水平与潜在生态风险态势比中部区域更严重。湿地边缘带农田土壤各重金属元素之间存在较强的相关性。其中 Cr、Cu、Mn 与 Ni 主要受到自然因素的影响, Pb 与 Zn 主要受到人为因素的影响, As 与 Cd 含量受自然因素和人为因素共同控制。近年来, 博斯腾湖流域社会经济的发展已经对湖滨湿地边缘带农田土壤环境质量产生了负面影响, 从而直接影响了博斯腾湖湿地生态安全。湿地边缘带农业生产过程中必须做好土壤重金属的污染防治工作, 尤其要防范农田土壤 Cd 的污染风险, 应采取有效措施控制污染源, 以维护湿地生态安全。

参考文献:

- [1] Blaser P, Zimmermann S, Luste J, et al. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in Swiss forest soils[J]. *Science of Total Environment*, 2000, 249: 257-280
- [2] 张晗, 靳青文, 黄仁龙, 等. 大宝山矿区农田土壤重金属污染及其植物累积特征[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 141-149
- [3] Wu G, Kang H B, Zhang X Y, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1): 1-8
- [4] 孙曦, 刘合满, 周通, 等. 林芝河谷地区典型农田土壤主要性质及重金属状况初探[J]. *土壤*, 2016, 48(1): 131-138
- [5] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1938-1945
- [6] 郑顺安, 唐杰伟, 郑宏艳, 等. 污灌区稻田汞污染特征及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(9): 2729-2736
- [7] 岳荣, 史锐, 张红. 土壤中重金属累积特征及生态风险评价——以乌拉特后旗有色金属冶炼企业集中区为例[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 314-321
- [8] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 692-703
- [9] 白军红, 赵庆庆, 卢琼琼, 等. 白洋淀沼泽化区域土壤重金属含量的剖面分布特征——以烧车淀为例[J]. *湿地科学*, 2013, 11(2): 271-275
- [10] 谢作轮, 赵锐锋, 张丽华, 等. 干旱内陆河流湿地景观破碎化模型构建与尺度分析——以黑河中游湿地为例[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(11): 1834-1845
- [11] 王宁宁, 胡毅, 王新军, 等. 新疆巴音布鲁克天鹅湖湿地有机碳储量初步估[J]. *湿地科学*, 2015, 13(3): 369-373
- [12] 麦麦提吐尔逊·艾则孜. 内陆河流域环境演变与生态安全[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016
- [13] 中华人民共和国农业部. 农田土壤环境质量监测技术规范(NY/T 395—2000)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000
- [14] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范(HJ/T 166—2004)[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004
- [15] 郑国璋. 农业土壤重金属污染研究的理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007
- [16] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, et al. Problems in the assessment of heavy metals levels in estuaries and the formation of pollution index[J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, 33(1/2/3/4): 566-575
- [17] 国家环境保护局科技标准司. 土壤环境质量标准(GB/T 15618-1995) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
- [18] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001
- [19] Rapant S, Kordik J. An environmental risk assessment map of the Slovak Republic: Application of data from geochemical atlases[J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(4): 400-407
- [20] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(S1): 49-53
- [21] 陈志凡, 范礼东, 陈云增, 等. 城乡交错区农田土壤重金属总量及形态空间分布特征与源分析——以河南省某市东郊城乡交错区为例[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(4): 1317-1327
- [22] Chai Y, Guo J, Chai S L, et al. Source identification of eight heavy metals in grassland soils by multivariate analysis from the Baicheng-Songyuan area, Jilin Province, Northeast China[J]. *Chemosphere*, 2015, 134: 67-75
- [23] Chang C Y, Yu H Y, Chen J J, et al. Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, south China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(3): 1547-1560
- [24] Boruvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 128: 289-300
- [25] Filizekp D B, Spururgeon D J, Broll G, et al. Pedological characterization of sites along a transect from a primary cadmium /lead/zinc smelting works[J]. *Eotoxicology*, 2004, 13: 725-737
- [26] Maas S, Scheifler R, Benslama M, et al. Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6): 2294-2301

- [27] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, et al. Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 78(3): 2–8
- [28] Zulpiya M, Hamid Y, Rouzi A, et al. Source identification and hazardous risk delineation of heavy metal contamination in Yanqi basin, northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493(15): 1098–1111

Contamination and Risk Assessment of Heavy Metal Elements in Farmland Soils Along Marginal Zone of Bosten Lake Wetland

Mamattursun EZIZ¹, Ajigul MAMUT¹, Mattohti ANAYIT¹, Anwar MOHAMMAD²

(1 *College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;*

2 *College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)*

Abstract: The geochemical characteristics of eight heavy metal elements (As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn) along the marginal zone of Bosten Lake Wetland were analyzed. The pollution and environmental risks of heavy metals in farmland soils were analyzed based on Pollution Load Index (PLI), Potential Ecological Risk Index (RI) and Ecological Risk Warning Index(I_{ER}). Results indicated that: 1) Pb and Zn were at high pollution levels, where as As, Cd, Cr and Ni at light pollution level, Cu at slightly pollution level and Mn at no pollution level. The average contents of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in soils were at slight ecological risk status. Cd was at the highest pollution level and ecological risk; 2) The average value of PLI for heavy metals was 1.43, which showed a light pollution level. The average value of RI was 20.62, which suggested a light ecological risk situation. The average value of I_{ER} was -4.53, which indicated a no warning situation. The spatial distribution of PLI, RI and I_{ER} were similar. 3) Pb and Zn of farmland soil along the marginal zone of wetland were affected mainly by the human activities, whereas Cr, Cu, Mn and Ni were affected mainly by the geochemical background of soil, and the main sources of As and Cd may be affected by the interaction of human activities and natural factors.

Key words: Soil; Heavy metal pollution; Ecological risk; Warning; Bosten Lake